

# 森林土壤退化與復育之基礎概念

◎林業試驗所福山研究中心·王巧萍

## 何謂土壤退化？

人類賴以為生的土壤具備有四個基本功能，一為維持生物多樣性及生物量之生產；其次是藉由過濾、緩衝及去毒(detoxification)等作用，來調節地質化學循環，改善水與空氣的品質；其三可保存考古、地質與天文等紀錄；第四是維持社會經濟的結構與文化及環境美學上的價值，以及提供各種如道路、建築、水利等工程的基礎。當土壤因為天然或人為的作用而喪失這些功能其中的一項或多項，便可定義為土壤退化。



土壤的過濾、緩衝及去毒等作用，在調節水與空氣的品質上扮演著極重要的角色(王巧萍 攝)

除了以上述土壤功能的喪失與否來定義土壤退化外，另外也可以以能量概念來討論土壤退化的過程與機制。因為土壤可說是鏈結地圈、水圈、大氣圈與生物圈界面中的一個能量庫(energy pool)，其能量來源包括下列三者：一是控制固體、液體與氣體在土壤內以及由土壤移動至其他介質的引力(gravity)；二為貯存在母岩形成過程中來自溫度與壓力

的能量(orogenic energy)，由於火成、層積與變質等三大類母岩在形成時所累積的能量都不一樣，因此由不同母岩所化育出來的土壤在礦物結構與化學組成上亦有很大的差異；三為直接或間接來自可再生的太陽能(renewable energy)所提供的土壤有機質及依賴土壤為生的生物。這三種能量的組合控制著土壤的物理、化學、生物等性質以及各種生物地質化學的過程，也因此當土壤能量損失或降低時，亦可定義為土壤退化。在全球人口大量膨漲且對生活品質的要求越來越高，而科技發展與資源開發同步快速成長，以致自然資源日益匱乏的現代，土壤退化已然嚴重影響到人類的生活，也因此成為當今人類所面對全球性的最大挑戰之一。



土壤退化不僅是農業、生態與環境問題，更是社會經濟與政治議題(王巧萍 攝)

## 土壤退化之原因

土壤退化的類型基本上分為天然與人為兩種，可以想見的是土壤的天然退化速率是緩慢且不可逆的，而工業化、都市化及農

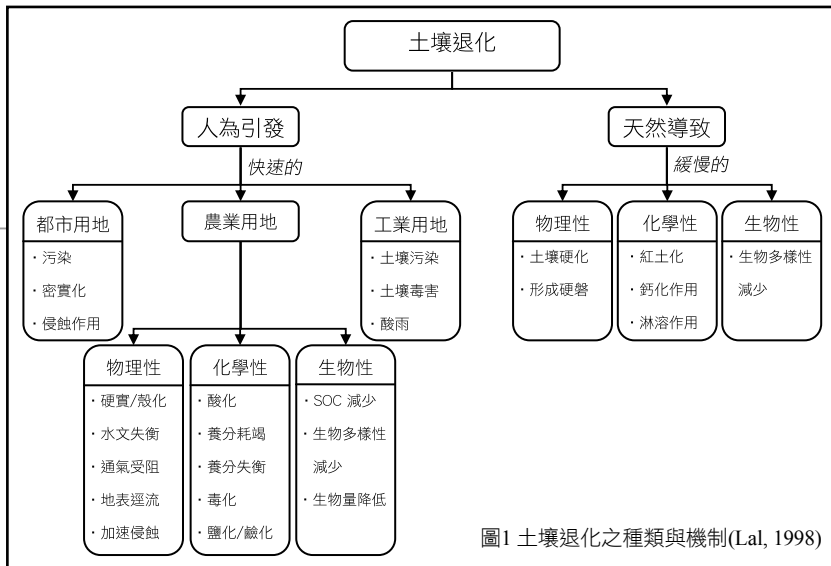


圖1 土壤退化之種類與機制(Lal, 1998)

土壤彈性應被定義為“已被干擾的土壤在新的擾動下，回復到另一個動態平衡的能力”。穩定型的土壤多具備良好的理化與生物性質，在面對無論是人為經營或天然擾動時，其本身

的土壤性質既不易產生變化，且復原能力也比退化過程為強；相對的，一個有彈性的土壤不必然是穩定的土壤，而是即使因人為經營或天然擾動導致其土壤性質與過程產生了變化，也能保有其生產力及調節環境的能力，提供土壤經營者所需要的功能。也因此在此明確的定義下，土壤彈性、穩定性及退化不再只是定性的概念爭議(表1)，而是可以透過下列公式取得適當的參數來量化與評估的指標。

業化等人為引發土壤退化的速度則為極為快速(圖1)。在工業化與都市化下，土壤多因受重金屬、污水及空氣污染而退化；而農業經營下的土壤退化則有土壤有機質與生物多樣性的減少、養分失衡甚至耗竭、酸化、鹽化、鹼化、毒化、硬實化與逕流等。然而由於土壤退化的形式不同，對人類的影響程度也因利用者的目的與角度不同而難以界定。例如在全球已退化土壤的面積及其對生產力的影響等相關文獻中，除了統計數字令人混淆外，環境學者與農林專家的觀點亦常出現矛盾。因此，為了解決不同領域的人在土壤退化觀點上的差異所衍生的爭議，有必要先建立所謂土壤品質、穩定性(stability)、彈性(resilience)與復育(rehabilitation)等概念與共識，並在此一概念上探討土壤退化的過程與因果關係，才能有效找出對抗土壤退化的方法。而其中最關鍵的因子就是土壤的品質與彈性。

業化等人為引發土壤退化的速度則為極為快速(圖1)。在工業化與都市化下，土壤多因受重金屬、污水及空氣污染而退化；而農業經營下的土壤退化則有土壤有機質與生物多樣性的減少、養分失衡甚至耗竭、酸化、鹽化、鹼化、毒化、硬實化與逕流等。然而由於土壤退化的形式不同，對人類的影響程度也因利用者的目的與角度不同而難以界定。例如在全球已退化土壤的面積及其對生產力的影響等相關文獻中，除了統計數字令人混淆外，環境學者與農林專家的觀點亦常出現矛盾。因此，為了解決不同領域的人在土壤退化觀點上的差異所衍生的爭議，有必要先建立所謂土壤品質、穩定性(stability)、彈性(resilience)與復育(rehabilitation)等概念與共識，並在此一概念上探討土壤退化的過程與因果關係，才能有效找出對抗土壤退化的方法。而其中最關鍵的因子就是土壤的品質與彈性。



土壤退化分為天然與人為兩種類型，而工業化、都市化及農業化則為人為引發土壤退化的主要因子(王巧萍 攝)

### 土壤彈性、穩定性與品質

一般生態學上對彈性的定義是指“系統在擾動後回復其動態平衡的能力”。但這樣的定義僅可用於未被干擾且呈動態平衡的系統上，而對於目前處於全球氣候變遷與人類開發下的絕大多數土壤而言並不適用，因此

$$\text{土壤穩定性(Sstability)} = (\text{Si} - \text{Sd})t$$

以土壤有機質或養分的退化為例，Si(improvement)是指土壤復原過程，亦即土壤有機質的累積速率或養分經風化而回補的速率；Sd(degradation)為土壤退化速率，亦即有

表1 土壤彈性、土壤穩定性及土壤退化在定義上之差異

	有彈性的土壤	穩定型土壤	退化性土壤
1. 對天然擾亂之反應	變化後亦會回復	不因擾動而改變	不可回復的劣化
2. 經營的影響	正面影響	不一定有影響	改善經營方式下亦難有正面助益
3. 生產力	具永續性	可以持續	改善經營方式下亦無法維持
4. 緩衝能力	高	高	低或無
5. 調節環境能力	高	高	低
6. 土壤品質(影響土壤性質與過程的臨界值)	有足夠的彈性	有彈性	臨界值範圍窄而嚴密

機質耗損或養分流失的速率；t則為時間，其長短是因受評估的土壤因子不同而調整。

$$\text{土壤彈性}(\text{Sresilience}) = \text{Sa} + \int_0^t (\text{Sn} - \text{Sd} + \text{Im}) dt$$

用於評估土壤彈性的適當準則包括土壤回復的能力、土地利用與管理、生產力、調節環境的能力與臨界值的範圍。以森林土壤有機質的退化為例，土壤彈性是由土壤先前的狀況(Sa, antecedent condition)，也就是在擾動或經營之前的有機質濃度，加上所測定時間內土壤有機質因自然回補(Sn, 亦指土壤性質更新或回復的速率)、天然耗損或流失(Sd, 即土壤退化速率)與經由人為管理而輸入(Im, management input, 亦即經由施肥或其他如打枝/疏伐施業處理所導致的增加速率)等三種速率之總合。

為了追求環境保護與永續，土壤品質在1990年代成為各界關注的重點。土壤品質指的則是土壤表現在經濟、生態、文化與美學等功能時的能力，而該能力的高低則端賴土壤固有的特質來決定，如結構屬性、根可生長的深度、養分庫大小、生物多樣性等。而土壤退化則由土壤品質、土壤彈性、氣候與經營等交互作用來定位(圖2)。

### 森林土壤之退化與復育

由上面的介紹來看森林土壤的退化，不難想像人類伐木收穫、將複雜的天然林變

更為單一純林、甚至將森林開發成農業、都市、道路、水壩等工程用地的行為，相較於自然重力所導致的土壤硬化，風、火與水所造成的母岩風化及土壤侵蝕與養分流失等緩慢的土壤退化而言，不僅強度加劇、速度加快、範圍更廣外，還因為涉及了社會經濟與文化層面，這也使得森林土壤的復育不只是與科學技術相關的生態、環境與工程問題而已，也是政策與政治問題。

伐木所造成的土壤退化以物理性質的改變最為明顯，其中包括土壤容積密度增高、土壤孔隙減少、穿透性降低而導致土壤沖蝕、地表逕流與有效性土壤水減少等。此外，也因為可以調節水文循環的森林消失，而造成的水文過程改變與水質劣化，進一步

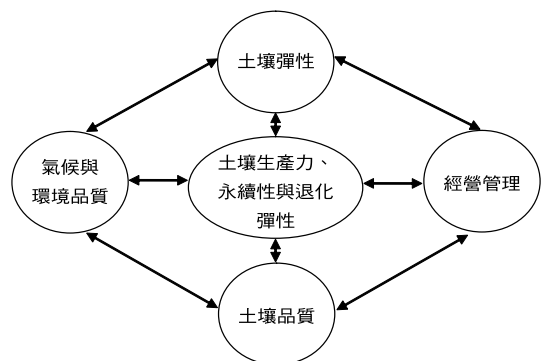


圖2 土壤退化的嚴重性及其對環境與生產力的衝擊，是受控於土壤彈性、土壤品質、氣候與土地經營利用等各項因子的交互作用(改自Lal, 1998)



土壤長期在重力、風化、侵蝕等自然力的作用下，亦會緩慢的自行退化(王巧萍攝)

影響了土壤化學性質。而林相變更所導致的土壤退化，主要則是因為在單一樹種的純林經營下，生物多樣性的改變；其次則是為了生產工業與燃料用材，因而栽植速生樹種，其中又以松屬、桉屬、相思樹屬及柚木屬為最主要營林種類，因而造成土壤養分之失衡，或較原來的林相更易引發火燒而導致土壤裸露、硬化、養分流失及水土沖蝕等，此一情形在熱帶地區特別嚴重。除了上述地域性的土地利用改變所造成的土壤退化外，森林還面臨因酸雨導致的土壤酸化、養分失衡甚至鋁毒化，以及全球氣候變遷引發的極端氣候所造成的水土流失、有機質加速分解、沙漠化與土壤生物多樣性改變等等大尺度的退化問題。

對於鹽化、油污染及曾因礦石開採而導致土壤退化的地區，造林可說是復育的基本方法。而許多的試驗研究也已證實，廢耕的農田與草生在造林及適當的經營施業下，有助於土壤性質的復育；而因純林經營引發如火燒等相關環境問題的林地，在再造林或混植其他樹種後，其土壤理化性質與生物多樣性都有明顯的進步。例如在奈及利亞西南方以貧瘠的紅壤為主的熱帶地區，在植林後不僅土壤中的有機碳與氮均明顯獲得補充，土壤的理化性質(如土壤pH值、土壤容積密



在評估土壤彈性時，必須將人為經營管理所輸入的衝擊，如施肥而造成土壤有機質與養分的增加，也一併列入考量(王巧萍攝)

度、通透性等)亦獲得改善。或如在自十九世紀以來即以松屬為主要營林樹種的西班牙地中海一帶，在混植闊葉的橡樹後，不僅火燒頻度與強度降低，土壤性質也因而改良。

## 結語

土壤退化除了在地區上、區域上與國際間造成經濟與環境的衝擊外，亦是當今全球性的問題。土壤退化的過程，不僅是現地的風侵水蝕、土壤硬化、結構變差、養分耗竭、酸化與鹽化，亦造成周邊環境如水文、水質、空氣品質劣化等問題。然而由於各界對於土壤退化的標準定義與評估準則仍不清楚，而其所造成的生產力與環境品質降低的認知在不同領域的人之間仍有爭議，加以至今仍未有足以量測有關土壤退化因子的標準方法，而使得目前有關土壤退化以及其後續引發的經濟損失等統計資料亦不可靠。也因此，要找出令人滿意的解決土壤退化問題的方法，必須整合土壤學、農學/林學、水文學、氣候學、生態學、經濟學與社會學之專家，組成跨領域的研究團隊，並讓土地管理利用者共同參與，方能制定出最佳的經營復育策略。⚠